

Raphael Rehm, Peter Fiener

Der unsichtbare Plastikmüll

Wie viel Mikroplastik steckt in unseren Böden?



Foto 1: In der Landwirtschaft werden zunehmend Folien verwendet – wie beispielsweise im Spargelanbau. Diese werden nach der Ernte meist von den Äckern entfernt. Einzelne Fragmente verbleiben jedoch auf den Feldern und können so zur Kontamination des Bodens führen

Das Ausmaß der terrestrischen Verschmutzung mit Mikroplastik ist noch weitgehend unbekannt. Es wird angenommen, dass die Belastung der Böden die der Meere bei weitem überschreitet. Neben den großen Unsicherheiten zum tatsächlichen Ausmaß der Mikroplastik-Akkumulation in Böden, sind auch die ökologischen Folgen noch kaum erforscht. Eine große methodische Herausforderung stellen der hoch komplexe Nachweis von Mikroplastik in Böden und die zu erwartende große räumliche Variabilität der Belastung dar.

Die zunehmend nachgewiesene Verbreitung von Plastik in unterschiedlichen Ökosystemen und die daraus entstehende Belastung finden immer mehr Interesse in der Öffentlichkeit. Dennoch lässt die prognostizierte Zunahme der Kunststoffproduktion weiter steigende Einträge in die Umwelt erwarten. Aufgrund ihrer vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten und geringen Kosten sind Kunststoffprodukte Teil des täglichen Lebens, in vielen Fällen aber nur mit sehr kurzer Nutzungsdauer. Das führt zu sehr hohen

Verbrauchs- und Verlustraten. In Bezug auf die tatsächlichen Belastungsmengen in den Ökosystemen und deren Auswirkungen bestehen große Unsicherheiten. Dies gilt insbesondere für sogenanntes Mikroplastik mit einer Partikelgröße zwischen 1 μm und 1000 μm . Unterschieden wird dabei zwischen primärem Mikroplastik, also Partikel, die in dieser Form hergestellt werden, z. B. Kosmetikzusätze, Kunststoffpellets, oder die bereits in diesem Größenbereich in die Umwelt gelangen, z. B. Abrieb von Autoreifen bzw. Fa-

sern aus Textilprodukten, und sekundärem Mikroplastik, das durch den Zerfall von Makroplastik ($> 1000 \mu\text{m}$) entsteht.

Nachweisgrenzen und Methoden

Mikroplastik konnte mittlerweile nicht nur in Meeren, sondern auch global in Inlandsgewässern, der Luft und in Böden nachgewiesen werden, wobei die Konzentrationen in den verschiedenen Ökosystemen um mehrere Größenordnungen variieren (Siegfried et al. 2017). Während sich die Forschung der letzten Jahre vor allem auf die aquatische Umwelt konzentrierte, ist das Ausmaß der Belastung von Böden noch weitestgehend unbekannt und basiert auf relativ groben Schätzungen anhand der Emissionsraten von Mikroplastik. Dies liegt u. a. daran, dass die Untersuchungsmethoden für Mikroplastik in Böden bisher extrem aufwendig sind und eine standardisierte Vorgehensweise fehlt.

Möglichkeiten zur Bestimmung bieten Spektroskopiemethoden wie die Fourier-Transformation-Infrarot-Spektroskopie und die Raman-Spektroskopie (Bläsing und Amelung 2018). Die optische Vergrößerung mit den spektroskopischen Methoden erlaubt die Detektion von Mikroplastik-Partikeln $> 10 \mu\text{m}$ bei einer gleichzeitigen Bestimmung der vorliegenden Polymerart. Die große Herausforderung liegt jedoch in der Trennung der Plastikpartikel von der Bodenmatrix, was mit abnehmender Partikelgröße aufwendiger und methodisch schwieriger wird. Dadurch wird die technisch mögliche Nachweisgrenze beschränkt und es gibt bisher nur wenige Untersuchungen, bei denen Partikel $< 50 \mu\text{m}$ erfasst wurden. Thermoanalytische Verfahren (Kopplung aus Gaschromatographie und Mas-



Foto 2: Reifenabrieb ist meist nur bei starken Brems Spuren sichtbar. Der weitaus größte Teil des Abriebs erfolgt aber im ganz normalen Fahrbetrieb und gelangt – kaum wahrnehmbar – durch Niederschläge in die Kanalisation, in Flüsse oder ins Erdreich

senspektrometrie) liefern Massenbilanzen, benötigen keine Extraktion der Bodenmatrix und können häufig vorkommende Polymerarten zuverlässig erfassen. Doch die Quantifizierungsgrenze liegt je nach Kunststoffart bei Konzentrationen von mehreren μg Plastik pro g Boden (Dümichen et al. 2015). Eine Menge, die in kleinen Bodenproben oft nicht erreicht wird. Verglichen mit Gewässerproben, können im Boden nur geringe Problemengen bearbeitet werden, was die Nachweisbarkeit zusätzlich erschwert. Ein fundamentales Problem beider Methoden stellt die Vergleichbarkeit ihrer Ergebnisse dar. Die optische Spektroskopie erfasst Anzahl und Größenverteilung der Mikroplastikpartikel, ohne das Gewicht zu bestimmen. Die thermoanalytischen Verfahren erfassen dagegen die Masse, erlauben aber keine Aussagen zu Größe und Anzahl der Mikroplastikpartikel.

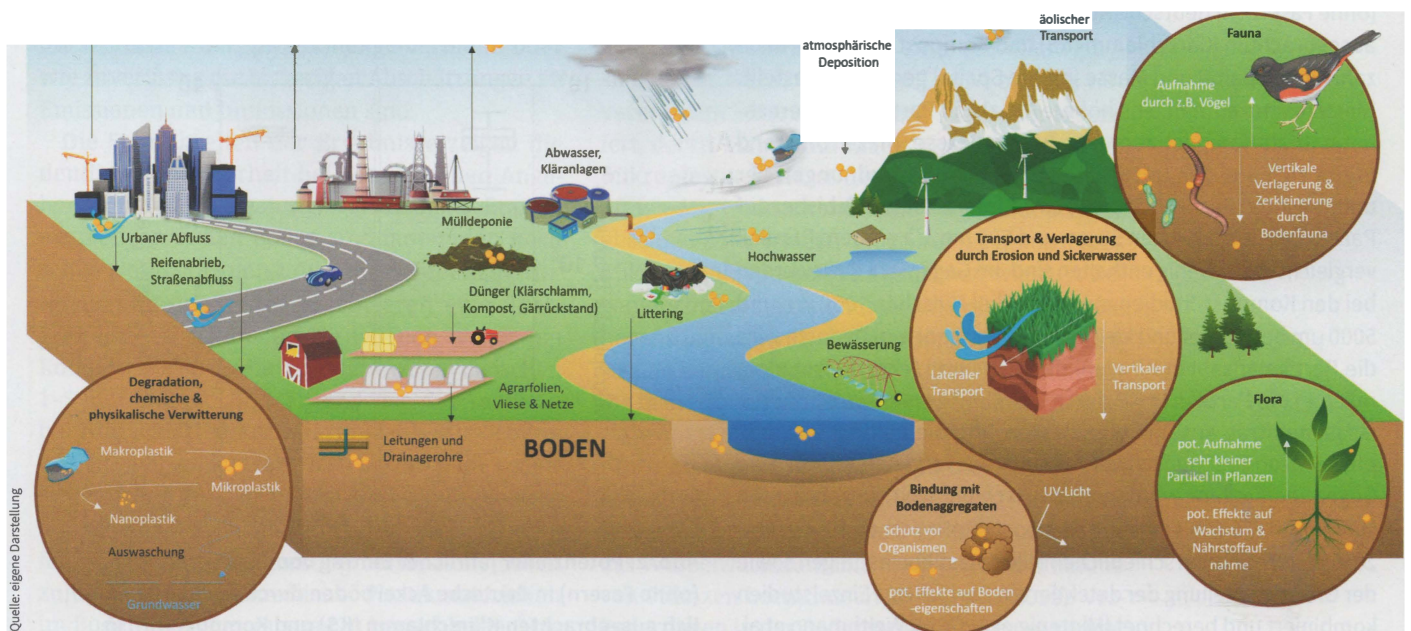


Abb. 1: Schematische Darstellung von Emissions- und Immissionsprozessen von Mikroplastik im System Boden, einschließlich potenzieller Quellen, Eintragspfade und ökologischer Effekte (Kreise)

Eintrag und Akkumulation in Böden

Die wichtigsten Eintragspfade von Mikroplastik in nicht landwirtschaftlich genutzte Böden sind weggeworfenes Plastik, Ablagerung bei Hochwasser, atmosphärische Deposition, Verwehung bzw. Verlust von Produktionsanlagen und Reifenabrieb (vgl. Abb. 1). Laut einer Emissionsschätzung des Fraunhofer-Instituts gelangen in Deutschland pro Jahr 450 000 t Kunststoff in die Umwelt (Bertling et al. 2018), wobei der Großteil von 330 000 t als Mikroplastik emittiert wird. Die größte Menge entstammt dabei dem Reifenabrieb (100 000 t/Jahr). Weitere wichtige Emissionspfade sind die Abfallbehandlung (11 000 t/Jahr), der Abrieb von Farben und Lacken (5 000 t/Jahr), der Abrieb von Makroplastik (8 000 t/Jahr), die Freisetzung von Spiel- und Sportplätzen (10 000 t/Jahr) sowie der Verlust von Mikroplastik in der verarbeitenden Industrie (15 000 t/Jahr) (Bertling et al. 2018). Dabei handelt es sich um Emissionswerte, die eine potenzielle Eintragsmenge für das terrestrische Ökosystem und vor allem die Böden darstellen. Wie viel Mikroplastik tatsächlich in Böden gelangt, wird in der Studie nicht abgeschätzt.

Ackerböden werden zudem durch Plastikmaterialien zur Produktionsoptimierung (z. B. Mulchfolien) und organische Dünger (z. B. Klärschlamm

und Kompost) mit Mikroplastik belastet. Agrarfolien werden zur Regulierung der Wärme- sowie Gas- und Wasserflüsse eingesetzt (Steinmetz et al. 2016). Die Folien unterliegen bei der Verwendung zahlreichen Abbau- bzw. Zerkleinerungsprozessen, sodass Teile des Folienmaterials im Boden verbleiben und im Laufe der Zeit in Mikroplastik umgewandelt werden (vgl. Abb. 1). Kompost und Klärschlamm werden seit langem im Sinne der Kreislaufwirtschaft als organische Dünger genutzt. Darin können unterschiedliche Mengen an Mikroplastik enthalten sein, wobei Kompost meist größere Plastikbestandteile und sekundäres Mikroplastik enthält, Klärschlamm dagegen meist primäres Mikroplastik (z. B. Textilfasern). Im Gegensatz zu Kompost, nimmt Düngung mit Klärschlamm zunehmend ab, da dieser unerwünschte und teilweise toxische Bestandteile enthalten kann (Umweltbundesamt 2018).

In deutschen Kläranlagen wurden Mikroplastik-Belastungen von 1 000 bis 24 000 Partikel (50–500 µm) pro kg Trockenmasse nachgewiesen (Mintenig et al. 2014). Unter Berücksichtigung der jährlichen Klärschlammausbringungen seit 2000 (Statistisches Bundesamt 2018, 2019) ergibt sich ein medianer Eintrag von $5,3 \cdot 10^9$ Partikeln pro Jahr bzw. 0,02 t/Jahr (Abb. 2). Für Kompost liegen bisher nur Belastungen von Makroplastik

■ Textbox 1

Ergebnisse richtig einschätzen

Klärschlamm wird in der Literatur als einer der größten Eintragspfade für Mikroplastik in die Böden diskutiert. Dabei muss deutlich zwischen Partikelanzahl und der Gesamtmasse unterschieden werden. Zur Veranschaulichung werden in Abb. 2 die Angaben des potenziellen jährlichen Eintrags von Plastikpartikeln (ohne Fasern) in deutsche Ackerböden durch landwirtschaftlich ausgebrachten Klärschlamm (KS) und Kompost (KP) in Partikelzahl (linke Spalte) und Masse (rechte Spalte) gegenübergestellt. Klärschlamm enthält eine höhere Anzahl an Partikel, umgerechnet enthält Kompost aber eine höhere Masse. Dieser Umstand ergibt sich aus den unterschiedlichen Größenordnungen der untersuchten Partikel. Studien zu KS fokussieren sich bisher auf Partikelgrößen zwischen 50 µm und 500 µm, da größere Partikel vergleichsweise wenig enthalten sind. Im Gegensatz dazu werden bei den Kompost-Studien meist Partikel zwischen 1000 µm und 5000 µm betrachtet und kleinere Partikel ignoriert. Dadurch wird die Partikelanzahl in KP wohl deutlich unterschätzt. Trotzdem machen die Partikel in KP durch ihre Größe einen weit höheren Masseneintrag aus. In Folge dessen sind die beiden Eintragspfade KS und KP nur schwer miteinander vergleichbar. Für eine Gegenüberstellung wurden die deutschlandweit ausgebrachten Mengen an Klärschlamm und Kompost (Statistisches Bundesamt 2018, 2019) mit unterschiedlichen Mikroplastikbelastungen sowie der Größenverteilung der detektierten Partikel aus Einzelstudien kombiniert und berechnet (Mintenig et al. 2014, Weithmann et al. 2018). Für die anschließende Umrechnung der Partikelanzahl in

die Masse, wurden für Mikroplastik in Klärschlamm sphärische Partikel, in Kompost quadratische Bruchstücke mit einer Stärke von 500 µm und einer Dichte von jeweils $0,97 \text{ g/cm}^3$ angenommen. Zu beachten ist die logarithmische Skalierung der Y-Achse in Abb. 2; die Boxplots (Kastengrafiken) geben Median, 1. und 3. Quartil sowie Minimum und Maximum an.

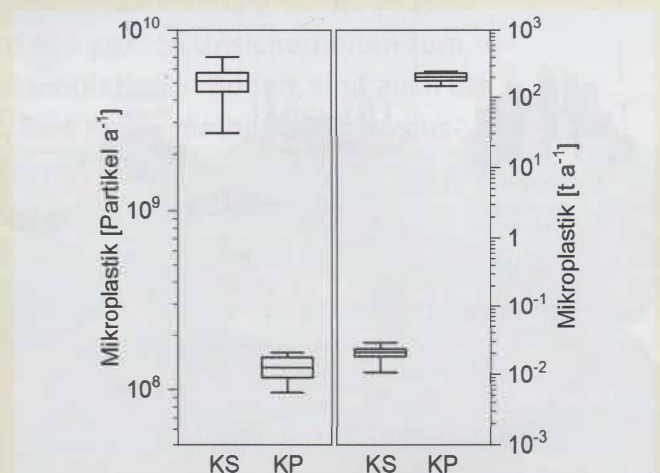


Abb. 2: Potenzieller jährlicher Eintrag von Plastikpartikeln (ohne Fasern) in deutsche Ackerböden durch landwirtschaftlich ausgebrachten Klärschlamm (KS) und Kompost (KP) in Anzahl und Masse (t = Tonne; a⁻¹ = pro Jahr)

Quelle: eigene Darstellung

■ Textbox 2

Mikroplastik in Ackerböden: Forschung in Augsburg

Die Arbeitsgruppe Wasser- und Bodenressourcenforschung an der Universität Augsburg beschäftigt sich im Rahmen des Verbundprojektes MicBin (www.micbin.de) mit dem Eintrag von Mikroplastik durch Bodenerosion in ausgewählte Zuflüsse der Donau. MicBin ist eines von insgesamt 18 Projekten des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt – Quellen, Senken, Lösungsansätze“. In Augsburg werden wiederholt Serien von Beregnungsversuchen auf unterschiedlichen Bodenparzellen durchgeführt (vgl. Foto 3), die zuvor mit einer definierten Menge an Mikroplastik belastet wurden (HDPE 53–100 µm, 250–300 µm). Um das ausgebrachte Plastik aus der großen Menge an Bodenproben zu extrahieren, wurde eine Labormethode entwickelt, die mit Dichtentrennung und Digitalmikroskopie arbeitet. Mit den Versuchen soll der potenzielle Austrag der Mikroplastikpartikel über die Bodenerosion bestimmt werden. Dabei geht es vor allem um die Frage, ob Mikroplastik mit geringer Dichte präferenziell ausgetragen wird oder ob eine Bindung an Bodenpartikel stattfindet, die den Austrag einschränkt. Neben der Klärung grundsätzlicher Fragen zum Verhalten von Mikroplastik in Böden werden die Experimente auch genutzt, um Modellparameter für eine Mikroplastikerosionsmodellierung abzuleiten. Mit dem Modell werden Eintragungsszenarien für ausgewählte Zuflüsse der Donau

simuliert. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Quantifizierung der Unsicherheiten der Modellergebnisse, die vor allem aus der bislang noch ausgesprochen mangelhaften Datenlage zur Mikroplastikbelastung in Böden resultieren.



Foto 3: Regensimulator zur Generierung von künstlichen Starkregenereignissen (Intensität 60 mm/h), um den Austrag von Mikroplastik durch Bodenerosion zu untersuchen Foto: R. Rehm, P. Fiener

(1000–5000 µm) mit bis zu 150 Partikeln pro kg Trockenmasse vor (Weithmann et al. 2018). Verrechnet man diese Konzentrationen mit der aus statistischen Daten vorliegenden Kompostmenge seit 2000, ergibt sich aufgrund der deutlich größeren Partikel ein medianer Eintrag von $1,3 \cdot 10^8$ Partikel pro Jahr bzw. eine Masse von 206 t/Jahr (vgl. Abb. 2). Dieser Masseneintrag in den Boden entspricht einem Bruchteil der Emissionsrate von 14000 t/Jahr, die bei Bertling et al. (2018) berechnet wird. Damit stellt sich die Frage, wo die restliche Mikroplastikmenge verbleibt oder wie zuverlässig die bisherigen Abschätzungen zu Emissionen und Immissionen sind.

Die Spannweiten der Ergebnisse zeigen die deutliche Unsicherheit bei den aktuellen Angaben der Bodenbelastung. Tatsächliche Emissionsmengen in den Boden sind momentan noch schwer einzuordnen und unterschiedliche Untersuchungsmethoden erschweren eine übergreifende Abschätzung. So wurden bisher bei Kompost meistens Partikel mit Größen zwischen 1–5 mm untersucht, während sich die Analysen bei Klärschlamm auf Mikroplastik mit Größen von 50–500 µm konzentrierten. Durch die unterschiedlichen Partikelgrößen sind die Ergebnisse nur schwer vergleichbar (vgl. Textbox 1). Zudem fehlen für eine Bilanzierung verlässliche Daten zum Abbau unterschiedlicher Plastikmaterialien im Boden und zum Austrag in benachbarte Ökosysteme, z. B. über die Bodenerosion (vgl. Textbox 2). Abschätzungen, wie die von Nizzetto et

al. (2016), die eine globale Belastung des terrestrischen Ökosystems mit der 4 bis 23-fachen Menge der Belastung der Ozeane angeben, sind also mit Vorsicht zu betrachten.

Ökologische Effekte und Toxizität

Die Auswirkung von Mikroplastik auf die Umwelt ist trotz ubiquitärer Verbreitung schwer abzuschätzen. Reine Polymere sind wenig reaktiv und die direkte Toxizität ist gering. Die bislang beobachteten Schädwirkungen sind vor allem physikalischer Natur. Plastikmüll wird oftmals mit verendeten Meerestieren und Seevögeln assoziiert, deren Mägen mit Makroplastik gefüllt sind. Mikroplastik verlässt den Organismus dagegen oft wieder, wodurch mögliche Folgen nur schwer absehbar sind. Studien haben bereits gezeigt, dass Mikroplastik von Bodenorganismen wie z. B. Regenwürmern aufgenommen und eine verkürzte Lebensdauer sowie Verhaltensänderungen verursachen kann (Rillig et al. 2017). Durch die Aufnahme in die Bodenfauna ist der Weg in die natürliche Nahrungskette geöffnet (vgl. Abb. 1). Bei hohen Konzentrationen von Mikroplastik könnte sich das auf die Lagerungsdichte sowie Luft- und Wasserverfügbarkeit der Böden auswirken und damit das Wurzelwachstum und die Nährstoffaufnahme von Pflanzen beeinflussen (Rillig et al. 2019). Veränderungen in der Bodenstruktur könnten zudem Auswirkungen auf Bodenaggregation, Mikroorganismen und biogeochemische Prozesse haben.



Foto: iStock by Getty Images (Maren Winter)

Foto 4: Kompost dient in der Landwirtschaft als organisches Düngemittel. Doch neben wertvollen Nähr- und Humusstoffen kann er auch Anteile an anorganischen Schadstoffen und Mikroplastik enthalten

Fazit

Große Mengen an Plastikmüll gelangen als Mikroplastik in die Umwelt und akkumulieren sich nicht nur in den Ozeanen, sondern auch in den Böden. Landwirtschaftliche Böden sind besonderen Belastungen ausgesetzt. Erkenntnisse über die Einträge, Quellen und Eigenschaften von Mikroplastik im Boden sowie mögliche Risiken von Mikroplastik auf die Biodiversität, Lebensmittelsicherheit und die Gesundheit müssen erst noch erarbeitet werden. Diese Überprüfung stellt einen wichtigen zukünftigen Forschungsbereich dar und ist die Basis, um Auswirkungen der Umweltverschmutzung mit Mikroplastik richtig einordnen zu können. ■

LITERATUR

- Bertling, J., Bertling, R. und L. Hamann (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.). Oberhausen
- Bläsing, M. und W. Amelung (2018): Plastics in soil: analytical methods and possible sources. *Science of the Total Environment* 612, S. 422–435
- Dümichen, E., Barthel, A.-K., Braun, U., Bannick, C. G., Brand, K., Jekel, M. und R. Senz (2015): Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method. *Water Research* 85, S. 451–457
- Minténig, S., Int-Veen, I., Löder, M., und G. Gerdt (2014): Mikroplastik in ausgewählten Kläranlagen des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) in Niedersachsen. Helgoland
- Nizzetto, L., Futter, M. und S. Langaas (2016): Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology* 50, S. 10777–10779

- Rillig, M.C., Ziersch, L. und S. Hempel (2017): Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports* 7, 1362
- Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado A. A. und G. Yang (2019): Microplastic effects on plants. *New Phytologist*
- Siegfried, M., Koelmans, A. A., Besseling, E. und C. Kroeze (2017): Export of microplastics from land to sea. A modelling approach. *Water Research* 127, S. 249–257
- Statistisches Bundesamt (2018): Umwelt. Abwasserbehandlung – Klärschlamm. Tabellenband. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2019): Fachserie 19 R. 1 2017. Umwelt. Abfallentsorgung. Wiesbaden
- Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Troger, J., Munoz, K., Fror, O. und G. E. Schaumann (2016): Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment* 550, S.690–705
- Umweltbundesamt (2018): Klärschlammabfuhr in der Bundesrepublik Deutschland. Dessau-Roßlau
- Weithmann, N., Möller J. N., Läder M. G. J., Piehl S., Laforisch C. und R. Freitag (2018): Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances* 4 (4) eaap8060

AUTOREN

MSc. Raphael Rehm, geb. 1990
Arbeitsgruppe Wasser- und Bodenressourcenforschung
Institut für Geographie der Universität Augsburg
raphael.rehm@geo.uni-augsburg.de
Schwerpunkte: Bodenkunde, Mikroplastik

Prof. Dr. Peter Fiener, geb. 1969
Arbeitsgruppe Wasser- und Bodenressourcenforschung
Institut für Geographie der Universität Augsburg
peter.fiener@geo.uni-augsburg.de
Schwerpunkte: Interdisziplinäre Forschung am Schnittpunkt zwischen Hydrologie, Bodenkunde und Biogeochemie

Summary

The invisible pollution: How much microplastic is hidden in soils?

Raphael Rehm, Peter Fiener

The magnitude of contamination of the terrestrial environment with microplastics is still largely unknown. However, there are initial estimates that the contamination of soils significantly exceeds the contamination of oceans. While a growing number of studies analyse the ecotoxicological effect of microplastics in aquatic systems, little is known regarding the effect of microplastics on soil health. Quantifying microplastics in soils is challenging, because the methods used are still under development and are mostly very time consuming, while an expected high variability in the microplastic contamination of soils requires extensive sample analysis.